

DOI: 10.5846/stxb202202260447

孙传淳, 王梓辰, 李景刚, 李灿, 王超. 基于生态系统多维特征的粤港澳大湾区国土空间生态保护修复分区研究. 生态学报, 2023, 43(5): 2061-2073.

Sun C Z, Wang Z C, Li J G, Li C, Wang C. Ecological protection and restoration zoning of territorial space in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on multidimensional ecosystem features. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2061-2073.

# 基于生态系统多维特征的粤港澳大湾区国土空间生态保护修复分区研究

孙传淳<sup>1, 2</sup>, 王梓辰<sup>1</sup>, 李景刚<sup>1, 2</sup>, 李 灿<sup>1, 2, \*</sup>, 王 超<sup>3</sup>

1 华南农业大学公共管理学院, 广州 510642

2 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室, 广州 510700

3 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012

**摘要:**我国国土空间生态保护修复已进入“山水林田湖草”系统治理和建设阶段。开展生态保护修复的分区研究, 正确认识生态系统的地域组合特征及其分异规律, 可以为落实系统治理理念提供空间指导。当前生态保护修复分区研究逐渐重视生态系统的完整性, 但对于生态系统表征维度相对单一, 导致对国土空间系统性综合认知受限。基于此, 基于生态安全理论以及生态系统综合评估框架, 构建生态保护修复分区的多维度指标体系, 以提升对国土空间的系统性综合认知。以流域为基本单元, 在评估粤港澳大湾区生态现状本底和退化特征的基础上, 采用空间聚类方法划分两级生态保护修复分区。结果表明: (1) 各流域生态现状质量和退化程度空间分异较为明显。生态现状质量呈现出外部高、中部低的圈层式分异特征。而生态退化空间分布则相对分散。(2) 以生态现状综合指数与一级分区指标数据的空间异质性为基础, 可将研究区划分为 5 个在空间上连续的生态保护修复一级区。以生态退化综合指数与二级分区指标数据的空间异质性为基础, 可在一级区内部分划出 11 类 29 个生态保护修复二级区。研究方案可为国土空间的“山水林田湖草”系统治理提供生态分区优化路径。同时也为研究区生态保护修复提供了空间决策支持。

**关键词:**生态保护修复; 生态分区; 生态安全; 生态现状综合指数; 生态退化综合指数; 粤港澳大湾区

## Ecological protection and restoration zoning of territorial space in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on multidimensional ecosystem features

SUN Chuazhun<sup>1, 2</sup>, WANG Zichen<sup>1</sup>, LI Jinggang<sup>1, 2</sup>, LI Can<sup>1, 2, \*</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>

1 School of Public Administration, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical area of South China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Guangzhou 510700, China

3 Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China

**Abstract:** The ecological protection and restoration of China's national land space has entered the stage of systematic management and construction of “mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands”. A comprehensive zoning study on the ecological protection and restoration can provide spatial guidance for the implementation of the concept of systemic governance by correctly understanding the characteristics of the geographical combination of ecosystems and their differentiation. The current zoning research on ecological protection and restoration is gradually focusing on the integrity of

基金项目: 国家社科科学基金项目 (20CGL063)

收稿日期: 2022-02-26; 网络出版日期: 2022-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lican@scau.edu.cn

ecosystems, but the dimension of ecosystem characterization is relatively single, leading to a limited comprehensive cognition of the spatial systemic nature of the country. This study constructs a multidimensional index system for the ecological protection and restoration zoning based on ecological security theory and a comprehensive ecosystem assessment framework, in order to improve the systematic and comprehensive cognition of territorial space. Using watershed as the basic unit, this study adopts a spatial clustering approach to delineate two levels of ecological protection and restoration zones based on the assessment of the current ecological background and degradation characteristics of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. The results show that: (1) The current ecological quality and degradation of each watershed vary greatly, and the spatial differentiation is also relatively obvious, but the current ecological quality shows a circled differentiation with high quality in the outer part and low quality in the middle. In contrast, the spatial distribution of ecological degradation is relatively dispersed. (2) Based on the spatial heterogeneity of the comprehensive ecological status index and first grade zoning index data, the study area can be divided into five spatially continuous first grade zones of ecological protection and restoration. Based on the spatial heterogeneity of the composite index of ecological degradation and second grade zoning index data, the study area can be divided into 11 categories and 29 secondary zones of ecological protection and restoration within the first grade zone. The research scheme of the study can provide an ecological zoning optimization path for the systematic management of “mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands” on territorial space. It also provides spatial decision support for ecological protection and restoration in the study area.

**Key Words:** ecological protection and restoration; ecological zoning; ecological security; comprehensive index of ecological status; comprehensive index of ecological degradation; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

加强国土空间生态保护修复是实现美丽中国愿景的重要举措。当前,我国生态保护修复已进入“山水林田湖草”系统治理和建设阶段。新时期的国土空间生态保护修复逐渐从单点、单要素、单过程的修复转向全域、全要素、全过程的协同治理<sup>[1]</sup>。然而,践行“山水林田湖草生命共同体”理念过程中,较多实践陷入“多要素简单加和”的困境<sup>[2]</sup>。相关实践并未严格从“生命共同体”的整体视角出发,难以有效贯彻治理的系统性、整体性、动态性和区域差异性。生态保护修复有必要采用生物地理区划、生态功能区划的方式达成对国土空间的系统性综合认知<sup>[3]</sup>。生态保护修复作为实现生态安全格局优化、生态系统过程稳定、生态系统功能提升的重要途径,其通过对流域高质量生态空间的保护,对受损生态系统的整体、全面的修复,为国土空间生态安全夯实了基础<sup>[3-4]</sup>。依据生态安全理论,维护国土空间生态安全要实现 3 个层次的目标:维护景观过程的完整性;保证生态系统服务的可持续性;防止生态系统退化<sup>[5-6]</sup>。因而基于生态安全理论构建生态保护修复分区的多维度指标体系是提高国土空间系统性综合认知水平,正确认识其空间分异规律的重要路径<sup>[7-8]</sup>。

生态保护修复分区研究是基于生态区划理论而进行的。早前相关研究主要是根据生态保护与修复的目的,结合土地利用、地形地貌、气候水文条件、植被以及区位等单一自然要素建立评价指标,进行生态保护修复的空间分区综合研究<sup>[9-11]</sup>。随着国土空间生态保护与修复这一更加强调系统性和整体性的概念的发展以及生态系统研究的不断深入,越来越多的学者开始从生态系统的角度建立综合评价指标体系,探讨国土空间生态保护修复分区<sup>[12]</sup>。例如一些学者基于生态系统各要素的相互关联,研究识别山水林田湖草生态保护修复优先区<sup>[7,13-14]</sup>。一些学者基于生态保护修复的最终目标,从生态系统服务提升的角度探讨国土生态修复或整治分区<sup>[15-17]</sup>。近年来也有大量学者通过区域生态系统服务供需平衡分析,构建区域国土生态保护修复的分区框架、实施路径以及指标体系的研究<sup>[18-20]</sup>。

总体上,生态保护修复分区研究逐渐重视生态系统的完整性,但对于生态系统表征维度相对单一,导致对国土空间系统性综合认知受限。获取生态系统较为全面的基本信息及对其进行综合评估是生态保护修复分区的前提。经过多次全国范围的生态系统综合评估实践之后,我国生态系统评估已基本形成基于生态系统的“格局-质量-服务-问题-胁迫”的评估框架<sup>[21]</sup>。该框架对于系统性获取不同尺度的生态系统基本信息,现势评估和掌握区域生态系统的综合状况起着非常重要的作用。其也较好地体现了生态安全理论的 3 个维度。现有国土空间生态保护修复分区相关研究还未能充分从以上框架和维度全面反映区域生态系统本底特征及其

空间异质性。此外,相关研究往往偏重区域生态系统静态本底特征。而对于生态系统结构、质量与服务的动态变化过程与人类活动对生态系统的动态胁迫,现有分区的指标体系对其考虑不足。

基于此,本文基于国土空间生态安全理论的 3 个维度目标,同时结合生态系统的“格局-质量-服务-问题-胁迫”的评估框架,构建多维生态系统检测与评估指标体系。以流域为基本单元,评估粤港澳大湾区生态现状本底和退化特征,达成对研究区国土空间的系统性综合认知。本研究采用空间聚类方法划分两级生态保护修复分区。一级区和二级区分别侧重生态系统保护目标和修复目标。而后针对分区方案提出生态保护修复重点,为区域国土空间生态保护修复实践提供借鉴。

从区域发展角度来看,粤港澳大湾区长期以来的经济社会快速发展,人地矛盾近年愈发突出,生态空间不断被挤占,生态系统退化甚至遭到破坏,资源环境和生态安全受到严重威胁,生态保护修复任务艰巨<sup>[22-24]</sup>。如何科学地全面掌握区域人地矛盾,凸显区域的生态本底和分异特征,探索其基于山水林田湖草海全要素的生态系统保护修复分区方案,既是完善国土空间保护修复研究有效路径,也是破解粤港澳大湾区生态环境这一短板的现实需求。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

粤港澳大湾区(以下简称“湾区”)位于我国华南地区的珠江三角洲,区域范围介于 21.57°—24.39°N, 111.36°—115.41°E 之间,总面积为 5.6 万 km<sup>2</sup>。研究区由广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆九市和香港、澳门两个特别行政区组成,是继美国纽约、旧金山和日本东京湾后的世界第四大湾区,是中国开放程度最高、经济活力最强、人口最密集的区域之一,区域城镇化率高达 85%<sup>[25]</sup>。湾区属于亚热带季风气候,光、热、水资源丰富,植被覆盖率与动植物多样性高。地势总体北部高,南部低,西北东部三面为丘陵和山脉,中部和东南部为冲积平原(图 1)。社会经济高速发展使得湾区目前面临生态空间萎缩、生态系统质量下降、生态系统胁迫加重、生态系统服务退化、空气污染以及水污染等一系列生态环境问题<sup>[26]</sup>。

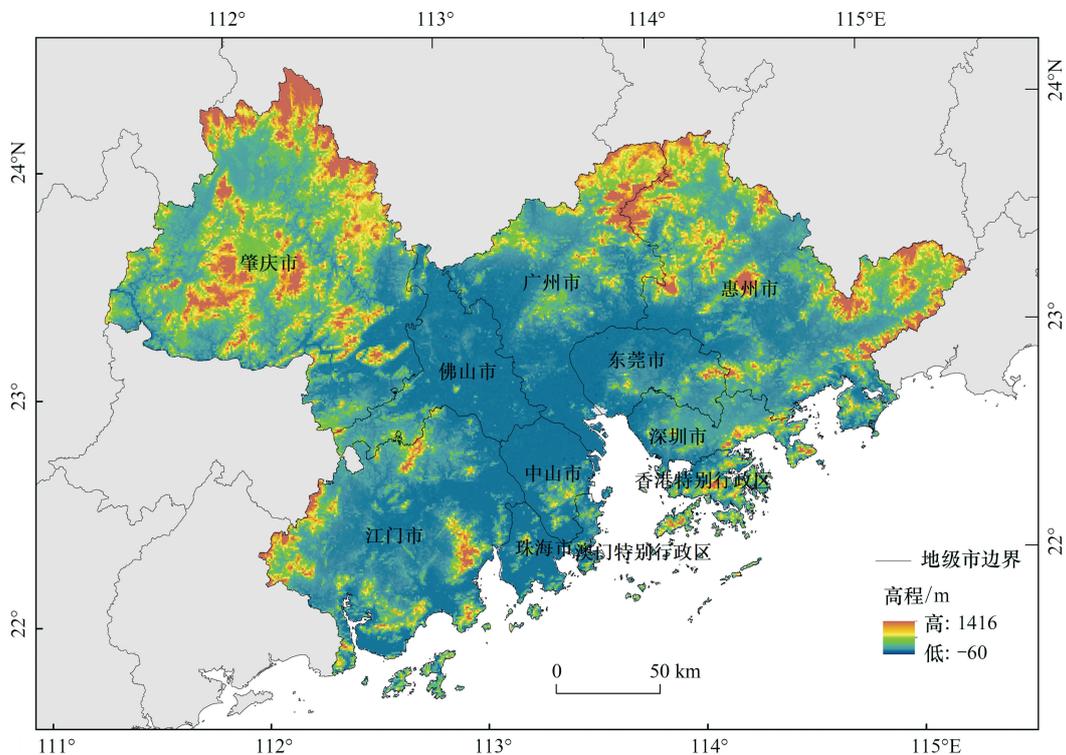


图 1 粤港澳大湾区区位置示意图

Fig.1 Location of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

<http://www.ecologica.cn>

## 1.2 数据来源

研究区基础数据包括土地利用/覆被栅格数据、采矿用地空间分布数据、植被净初级生产力栅格数据、数字高程模型 (DEM) 数据、人口密度栅格数据、生态系统服务栅格数据 (水土保持服务和产水量)。数据来源如下:

土地利用/覆被栅格数据来源于中国科学院资源环境数据中心,空间分辨率为 1km,数据年份为 2010 年和 2020 年。该数据无采矿用地分类,本研究采用遥感目视解译的方法获取采矿用地类型。遥感影像来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 10m;植被净初级生产力数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 地球观测系统数据和信息系统 (EOSDIS) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hv006>),空间分辨率为 500m,数据年份为 2010—2019 年;DEM 数据来源于中国科学院资源环境数据中心,空间分辨率为 1km;人口密度栅格数据来源于 WorldPOP 人口空间数据与研究开放平台 (<https://www.worldpop.org/>),空间分辨率为 1km,数据年份为 2010 年和 2020 年;水土保持服务、产水量服务空间分布数据来源于 Xu 等的研究成果<sup>[27]</sup> (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124153>),空间分辨率为 1km,数据年份为 2005 年和 2015 年。

## 2 研究框架与方法

### 2.1 研究框架

本文以生态安全理论为基础,基于景观过程完整、生态系统服务可持续、防止生态退化 3 个维度目标,充分考虑区域生态系统格局、质量、服务、胁迫的分异特征,构建分区指标体系,并结合区域生态系统现状和时空变化特征,建立两级分区体系。分区目的是通过揭示自然生态区域的相似性和差异性规律,归纳外部扰动对区域生态系统的影响。系统性达成对国土空间生态系统的综合认知。并且识别不同分区的主导生态优势和主要生态环境问题。从而为区域经济的发展和环境保护政策的制订提供科学依据。一级区重点关注生态系统现状本底,即由指标体系及综合评估反映出来的现状生态优势特征。目标是对分区内的主导生态优势进行保护。二级区重点关注生态系统退化程度,即由指标变化所反映出来的近 10 年来的生态系统退化特征。目标是对分区内的局部退化区域进行修复。修复的重点是与一级区主导功能有关的退化指标。以进一步实现一级区的保护目标。研究框架如图 2 所示。

生态系统通常能够在流域尺度形成一个较为完整的单元,相较于栅格像元更能体现生态问题<sup>[8]</sup>。因此本文利用 ArcGIS 软件水文分析工具,采用 DEM 数据提取研究区域的河网水系并进行子流域划分。而后以各流域为基本单元,基于指标数值进行空间聚类分析。空间聚类使用 ArcGIS 的分组分类工具。其中一级和二级区分组分类时还将分别纳入生态现状和生态退化综合评估结果。二级分区受到一区分区的空间约束。分组有效性通过 Calinski-Harabasz 伪  $F$  统计量来测量, $F$  值是一个反映组内相似性和组间差异性的比率<sup>[28]</sup>。 $F$  值越大代表着类自身越紧密,类与类之间越分散,即更优的聚类结果。

生态现状一级区的命名方法为“编号+主导生态质量(或服务)因素+保护区”,例如: I 水土保持保护区。生态退化二级区的命名方法为“二级编号+主导退化因素+质量提升区(或胁迫控制区、服务提升区、综合保护区、综合修复区等)”,例如: I-1 水土保持服务改善区。

### 2.2 分区指标体系构建

依据国土空间生态安全理论的 3 个维度目标。本研究分区指标体系从维护景观过程的完整性、保证生态系统服务的可持续性、防止生态系统退化等 3 个方面构建。

首先,山水林田湖草要素之间在景观尺度上是高度关联的<sup>[29]</sup>。国土空间生态修复的首要目标是将具有一定景观生态关联的受损生态系统在人为干预下实现系统的自我演替与更新<sup>[30]</sup>。即要实现景观格局与生态过程良性交互演替。分区内自然景观的连通性以及生态系统结构的多样性的特征是生态系统过程完整的基础。其次,提供优质生态产品、提升区域生态系统服务水平和民生福祉,是国土空间生态保护修复的重要使

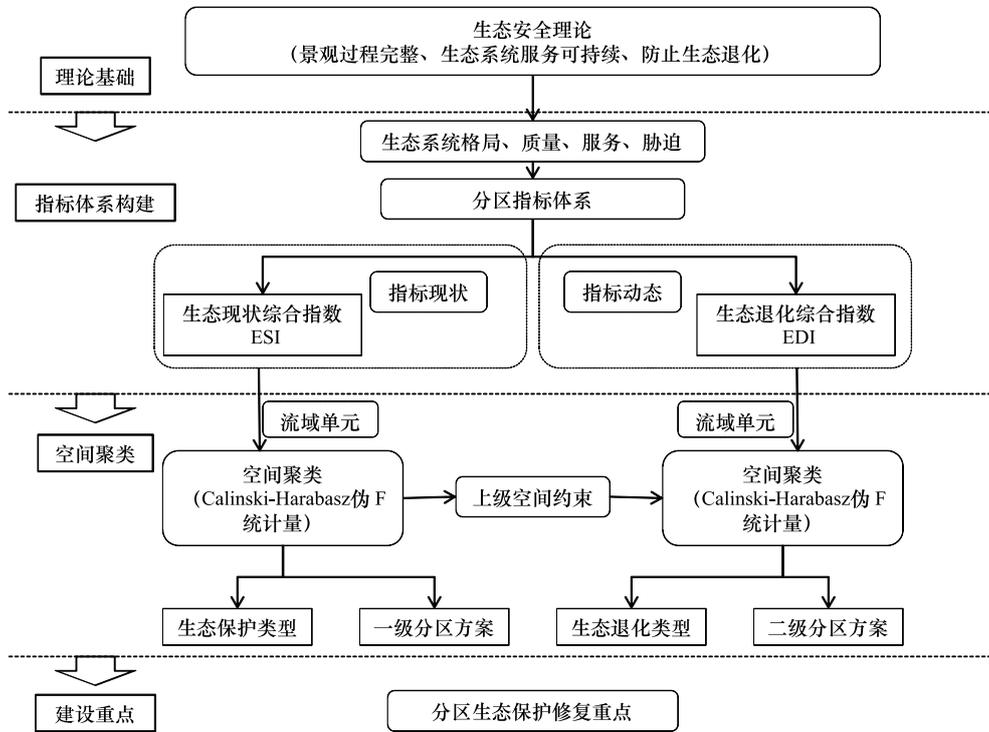


图2 研究框架  
Fig.2 Research framework

命。生态系统服务作为连接生态系统与人类福祉的桥梁,其可持续性对于维持生态系统结构-格局-过程-功能-人类惠益(服务)相互关联起着重要作用。而生态系统质量一方面是保持生态系统服务可持续性的前提条件,另一方面也是防止生态系统退化的基本保障。再次,人类活动给自然资源和生态系统构成巨大胁迫,人类活动对于生态系统退化扮演着极为重要的角色<sup>[31]</sup>。生态区划需要充分考虑人类活动强度。

以上维度与生态系统的“格局-质量-服务-问题-胁迫”的评估框架具有较高的吻合度。基于此,本文构建以下生态保护修复分区指标体系(表1)。

(1)生态系统格局与质量指标。包含生态系统结构、自然斑块连通度、生境质量、植被净初级生产力4个指标。生态系统结构参照了邵全琴等<sup>[32]</sup>的研究中所定义的土地覆被类型的生态级别,得到不同生态系统结构的类型级别及其分值;自然斑块连通度表示自然用地的连通程度,表征自然生态系统的生态流畅通程度;生境质量则反映生物栖息地本身质量及其周边的人类活动强度,土地利用强度越大,生境质量就随之降低<sup>[33]</sup>;植被净初级生产力是指生态系统中植被在单位时间、单位面积上所产生的有机物质的总量,也是评价生态系统质量特征的重要指标。

(2)生态系统服务指标。包含生物多样性、水土保持服务以及产水服务3个指标。一方面由于生态系统服务类型多样,其中支持服务是其他生态系统服务基础。本研究选取以上较为典型的支持服务类型表征研究区生态系统服务特征。另一方面本研究也是针对区域自然地理和社会经济特征,重点考虑气候、地形地貌对水土保持的较大影响以及社会经济发展对水资源的需求。

(3)生态系统胁迫指标。包含非自然用地胁迫强度、人口密度以及生境破碎度3个指标。首先,本区域生态系统的压力主要来源于人类活动范围的扩张与人口增长,因此非自然用地(建设用地、采矿用地以及耕地)胁迫与人口胁迫是导致区域生态系统退化的两个重要方面;其次,生境破碎度表示人类活动对生物栖息地完整性的影响程度。人类活动强度越大,生境破碎度越高,对生态系统的胁迫就越大。

表 1 生态保护修复综合指标体系

Table 1 Comprehensive ecological protection and restoration indicators

类型 Types	指标名称 Name of indicators	指标方向 Direction of indicators	指标计算方法 Calculation methods
生态系统格局 Ecosystem pattern	生态系统结构	+	基于土地利用/覆被数据,采用生态系统结构级别计算得分 <sup>[32]</sup>
	自然斑块连通度	+	基于土地利用/覆被数据,采用 Conefor 景观分析软件计算 <sup>[34]</sup>
生态系统质量 Ecosystem quality	生境质量	+	基于土地利用/覆被数据,采用 InVEST 模型中栖息地质量模块的计算 <sup>[35]</sup>
	植被净初级生产力	+	—
生态系统服务 Ecosystem services	生物多样性	+	采用生物多样性服务当量计算方法计算 <sup>[36]</sup>
	水土保持	+	InVEST 模型水土保持模块的计算结果 <sup>[27]</sup>
	产水量	+	InVEST 模型产水量模块的计算结果 <sup>[27]</sup>
生态系统胁迫 Ecosystem threat	非自然用地胁迫强度	-	InVEST 模型中栖息地质量模块 <sup>[35]</sup> ,相关参数借鉴文献 <sup>[35,37-38]</sup>
	人口密度	-	—
	生境破碎度	-	基于土地利用/覆被数据,采用 Fragstats 景观分析软件计算

### 2.3 分区基本单元(小流域)提取

本研究利用 DEM 数据,通过确定汇流累积量阈值,并与实际河流水系进行对比,获取流域边界。在提取过程中,当阈值为 200 时,发现提取的水系与实际河流水系的干流吻合度较高,而在水系分支部分拟合性略差。考虑到数字河网提取时的误差,此种情况在允许范围内,对后续的研究不会造成实质性的影响。因此在确定汇流累积量阈值 200 的基础上,提取小流域。而后对细碎零散的海岛进行合并整理,最终获取到 200 个小流域,以其作为国土空间保护修复分区的基本单元。本文通过叠加提取到的河流水系与土地利用现状图中河流的缓冲区(1km),发现重合度接近 80%,进一步验证了小流域提取的科学性。

### 2.4 生态保护修复综合评价

本研究采用线性加权法分别构建一级区和二级区的生态现状综合指数和生态退化综合指数。生态现状综合指数主要用于评估生态系统本底状况;生态退化综合指数主要用于反映区域生态系统的动态退化特征。

#### (1) 生态现状综合指数

参考宋伟等构建的生态修复指数,构建本研究一级区生态现状综合指数<sup>[8]</sup>。

首先,由于各指标的计算标准不同,趋势方向也存在差异。因此,在后续分析之前需要采用最大最小值法对指标进行无量纲和同趋势化处理,公式如下:

$$\text{正向指标: } X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X'_{ij} = \frac{X_j^{\max} - X_{ij}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \quad (2)$$

式中, $X'_{ij}$ 表示标准化后的指标值, $X_{ij}$ 表示指标的实际值, $X_j^{\min}$ 表示指标的最小值, $X_j^{\max}$ 表示指标的最大值。

其次,利用指标标准化后的数据,采用熵权法确定各指标赋的权重。

最后,基于指标值和权重,构建线性加权的生态现状综合指数(ESI)。该指数反映了湾区生态本底质量综合状况。指数越大,代表区域生态质量越好,越是生态安全保护的重点区域。指数计算公式如下:

$$ESI = \sum_{i=1}^n w_i \times E_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, 10) \quad (3)$$

式中, $E_i$ 为第*i*项指标在评价单元*n*内的标准化后的平均值, $w_i$ 为第*i*项指标的权重。

## (2) 生态退化综合指数

将标准化后的指标图层进行叠加分析,得出近 10 年来区域生态系统质量变化特征。本研究仅考虑基本单元内部生态退化部分特征,暂不考虑单元内生态系统提升和不变部分。将单元内部某指标降低平均值作为该单元该指标的退化值。而后,基于基本单元的退化值构建线性加权生态退化指数(EDI)。该指数反映区域生态系统退化区域范围和退化程度。指数越小,则代表生态系统退化程度越大,越需要加强生态修复。指数计算公式如下:

$$EDI = \sum_{j=1}^n w_j \times E_j \quad (j=1, 2, 3, \dots, 10) \quad (4)$$

式中,  $E_j$  为第  $j$  项指标在评价单元  $n$  内部的平均退化值,  $w_j$  为第  $j$  项指标的权重,权重由熵权法确定。

## 3 结果分析

### 3.1 生态保护修复一级区

#### (1) 生态现状综合质量评估结果分析

综合各项指标因素,测算出各流域生态现状综合指数 ESI(图 3)。结果表明,各流域 ESI 值介于 0.08 至 0.90 之间。总体而言,各流域 ESI 值差异较大,空间分异明显,呈现出外部高、中部低的圈层式分异特征。ESI 值较高的区域主要分布在西北部和东北部。主要涉及范围为肇庆市全域,惠州市和广州市北部的山区;ESI 值中等的区域主要分布在惠州市、江门市以及香港地区;ESI 值较低的区域主要分布在研究区中心以及沿海的地势平坦地区。

#### (2) 生态保护修复一级区

综合各指标值以及生态综合质量评估结果的空间聚类结果显示,分区为 2 组  $F$  值最大( $F=71.04$ ),表明 2 组时聚类效果最好。但考虑到两个组面积差异太大,且分区数量不足,难以满足生态管理需求。因此本文选用了  $F$  值下降的拐点处(第 5 组,  $F=48.25$ )作为较优组数,将湾区分为 5 类空间上连续的生态保护修复一级区(图 4)。

根据综合分析的主导因素相结合的原理,本研究对分区进行了命名。分区分别为生态系统质量综合保护区、水土保持与生物多样性综合保护区、产水与自然斑块连通综合保护区、植被与水土保持区以及产水服务维持区(表 2)。

分区 I 为生态系统质量综合保护区。该区涵盖肇庆市大部分区域,面积  $12299.43\text{km}^2$ ,包含了 50 个子流域,平均生态现状综合指数为 0.61,生态系统综合质量处于高水平。该区较多优于其他区域的生态现状指标为自然斑块连通度与生态现状综合指数。该区生态系统结构、生境质量与生物多样性等指标值均大于其他区域,其基本上无低值指标,因此需要综合保护。该区生态系统胁迫方面的 3 个指标均低于其他区域,区域受到的生态系统胁迫较小。

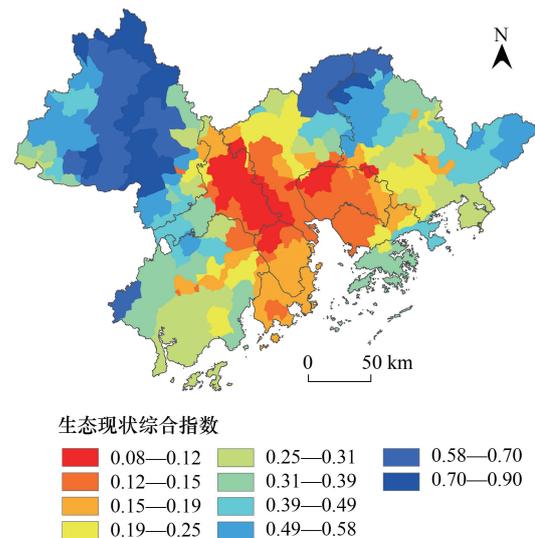


图 3 生态现状综合指数(ESI)空间特征

Fig.3 Spatial features of ecological status index (ESI)

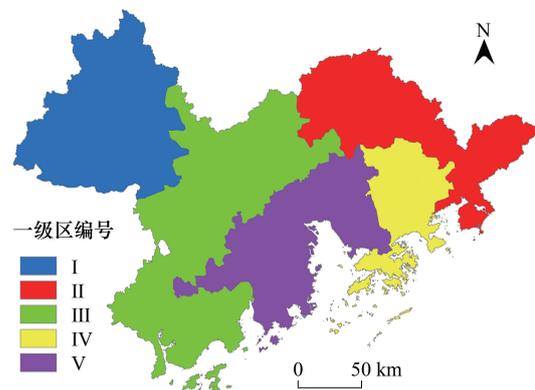


图 4 生态保护修复一级区

Fig.4 First grade ecological protection and restoration zone

表 2 生态保护修复一级区相关特征

Table 2 Features of first grade ecological protection and restoration zone

一级区编号 Serial number of first grade zone	分区名称 Name of the zone	主导生态系统 质量因素 Dominant ecosystem quality factors	子流域数量/个 Number of watersheds	平均生态现状 综合指数 Average value of ecological status index	面积/km <sup>2</sup> Area
I	生态系统质量综合保护区	自然斑块连通度 生态现状综合指数 生态系统结构 生境质量 生物多样性	50	0.61	12299.43
II	水土保持与生物多样性 综合保护区	水土保持 植被净初级生产力 生物多样性	34	0.46	10275.27
III	产水与自然斑块连通 综合保护区	产水量 自然斑块连通度 水土保持	50	0.28	17449.01
IV	植被与水土保持区	植被净初级生产力 水土保持	17	0.24	5071.28
V	产水服务维持区	产水量	49	0.14	9984.61

分区 II 为水土保持与生物多样性综合保护区。该区位于湾区东部,涉及惠州市东北部、广州市从化区与增城区,面积 10275.27km<sup>2</sup>,包含了 34 个子流域,平均生态现状综合指数为 0.46,生态系统综合质量处于较高水平。该区较多优于平均值的生态现状指标为水土保持、植被净初级生产力与生物多样性,因此需要综合保护。该区的产水量指标低于平均值,产水服务能力有待提升。

分区 III 为产水量与自然斑块连通综合保护区。该区涉及肇庆市东南部、广州市西北部、佛山市西北部以及江门市大部分地区,面积达 17449.01km<sup>2</sup>,是 5 类分区中面积最大的区域,包含了 50 个子流域,平均生态现状综合指数为 0.28,生态系统综合质量处于中等偏低水平。该区的产水量、自然斑块连通度与水土保持生态现状指标略优于平均值,其他指标均处于全局中等偏下水平。其中最大的限制因素为人口密度偏高。

分区 IV 为植被保护与水土保持区。该区域位于湾区东南部,涉及惠州市西南部、东莞市东部、深圳市东部以及香港地区,面积 5071.28km<sup>2</sup>,城镇化水平相对较高,是 5 类分区中面积最小的区域,包含了 17 个子流域,平均生态现状综合指数为 0.24,生态系统综合质量处于较低水平。总体特征与分区 III 较相近,但指标值普遍略低于分区 III。该区仅水土保持生态现状指标高于总体平均值,其余生态现状指标均处于较低水平。其中,该区的产水量、景观破碎度、非自然用地胁迫强度是主要生态限制因素。

分区 V 为产水服务维持区。该区域位于湾区南部,珠江水系出海口区域,为城市发展核心区。涉及中山市、珠海市、东莞市西部、深圳市西部、广州市南部、江门市东部以及惠州市北部小部分地区,面积 9984.61km<sup>2</sup>,包含了 49 个子流域,平均生态现状综合指数为 0.14,生态系统综合质量处于极低水平。该区的生态现状指标均处于全区下等水平,其中生物多样性与生境质量两指标较大幅度低于其他区域。

### 3.2 生态保护修复二级区

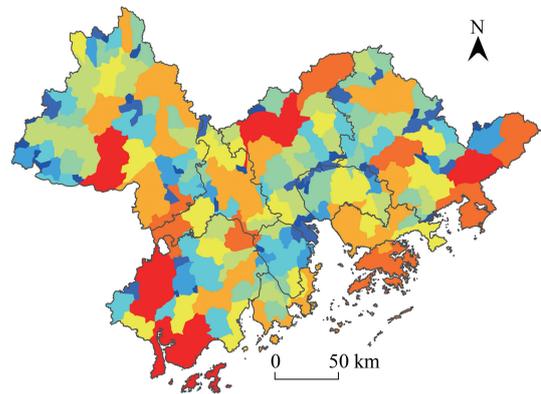
#### (1) 生态退化综合评估结果分析

由于生态退化综合指数的计算是生态现状综合指数的延伸,二级区指标主要体现生态系统退化特征,因此二级分区需要在一级分区内部进行。本文综合各退化指标因素,测算各流域生态退化综合指数 EDI (图 5)。结果显示,各流域 EDI 值介于 -0.64 至 0.00 之间,流域间指数差异较大,空间分异较为明显且较为分散,EDI 值较低的地区为肇庆市南部、江门市西部、惠州市东部以及广州市中部地区。

(2) 生态保护修复二级区

依据 F 值大小及其变化规律, 获取较优组数, 将 5 个一级区划共分为 29 个二级区(图 6)。依据主导退化指标的相似性与差异性。将退化分区归纳为 11 类生态修复分区(表 3), 分别为生态系统综合修复区、自然用地斑块连通度提升区、人口胁迫控制区、生态系统质量维持区、植被保护与生境破碎控制区、水土保持服务提升区、生物多样性服务提升区、生境质量提升区、产水服务提升区、人类活动扩张控制区、生态系统结构质量提升区等。

空间聚类以及归纳分类分析结果显示, 一级区 I 内包含生态系统综合修复区、自然用地斑块连通度提升区、人口胁迫控制区、生态系统质量维持区、植被保护与生境破碎控制区 5 类 8 个二级分区, 其中退化程度较大的为分区 I-1。一级区 II 包含生态系统综合修复区、生态系统质量维持区、水土保持服务提升区、生物多样性服务提升区、生境质量提升区 5 类二级区, 其中退化程度较大的为分区 II-5。一级区 III 包含生态系统综合修复区、自然用地斑块连通度提升区、人口胁迫控制区、生态系统质量维持区、产水服务提升区 5 类 7 个二级分区, 其中退化程度较大的为分区 III-1 和 III-6。一级区 IV 包含生态系统综合修复区和自然用地斑块连通度提升区 2 类二级分区。其中退化程度较大的为分区 IV-1。一级区 V 包含自然用地斑块连通度提升区、人口胁迫控制区、生态系统质量维持区、植被保护与生境破碎控制区、水土保持服务提升区、人类活动扩张控制区、生态系统结构质量提升区 7 类二级分区, 其中退化程度较大的为分区 V-1 和 V-5。



生态退化综合指数  
-0.64—-0.56    -0.18—-0.13    -0.05—-0.02  
-0.56—-0.34    -0.13—-0.10    -0.02—0  
-0.34—-0.24    -0.10—-0.07  
-0.24—-0.18    -0.07—-0.05

图 5 生态退化综合指数(EDI) 空间特征  
Fig.5 Spatial features of ecological degradation index (EDI)

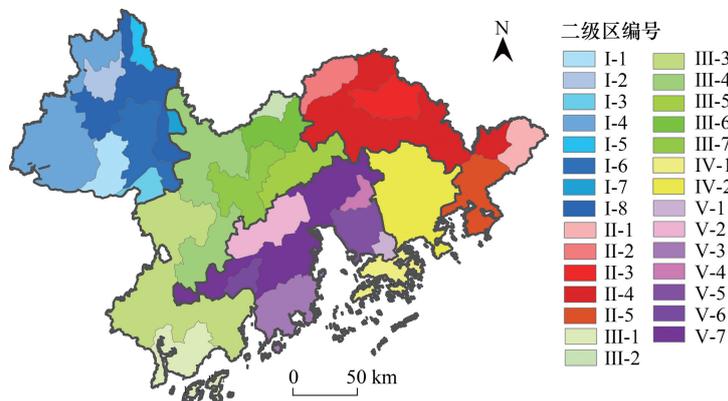


图 6 生态保护修复二级区

Fig.6 Second grade ecological protection and restoration zone

4 讨论与结论

4.1 分区保护修复重点

在两级生态保护修复分区的基础上, 针对分区主导优势因素以及退化因素, 提出湾区未来的生态保护修复重点。其中对二级区中退化因素的修复服务于一级区的生态保护目标。

表 3 生态保护修复退化二级区相关特征

Table 3 Features of second grade ecological protection and restoration zone

二级区编号 Serial number of second grade zone	分区类型名称 Name of the zone	主导退化因素 Dominant degradation factors	平均生态退化综合指数 Average value of ecological degradation index	二级区编号 Serial number of second grade zone	分区类型名称 Name of the zone	主导退化因素 Dominant degradation factors	平均生态退化综合指数 Average value of ecological degradation index	二级区编号 Serial number of second grade zone	分区类型名称 Name of the zone	主导退化因素 Dominant degradation factors	平均生态退化综合指数 Average value of ecological degradation index
I-1	生态系统综合修复区	产水量 生境质量 生物多样性	-0.56	I-3	人口胁迫控制区	人口胁迫	-0.29	II-1	水土保持服务提升区	水土保持	-0.39
II-5		人口胁迫 产水量 生物多样性	-0.53	III-7		生态系统结构 人口胁迫	-0.30	V-3	生物多样性服务提升区	产水量 生物多样性	-0.17
III-1		植被净初级生产力 水土保持	-0.64	I-2	自然用地斑块连通度提升区	产水量 自然用地斑块连通度	-0.19	II-3	生境质量提升区	生境质量 生境质量	-0.26
III-6		产水量 非自然用地胁迫 自然用地斑块连通度 生境破碎度	-0.60	I-7			-0.11	III-3	产水服务提升区	产水量	-0.19
IV-1		水土保持 产水量 植被净初级生产力	-0.45	III-4			-0.11	V-2	人类活动扩张控制区	非自然用地胁迫 生态系统结构	-0.22
I-4	生态系统质量维持区	无	-0.08	III-5			-0.12	V-6	生态系统结构质量提升区	生态系统结构 生物多样性	-0.25
I-5			-0.08	IV-2			-0.15				
I-6			-0.08	V-1		自然用地斑块连通度 人口胁迫	-0.29				
II-4			-0.08	I-8	植被保护与生境破碎控制区	生境破碎度	-0.23				
III-2			-0.06	V-4		植被净初级生产力	-0.19				
V-7			-0.06								

(1) 生态系统质量综合保护区(分区 I)的生态现状本底优势在于生态系统综合质量高。其生态系统结构质量、自然斑块的连通度以及生物多样性水平等指标处于较高水平。然而,该区域近年也存在一定程度的生态退化问题。主要表现在局部区域的生境质量、生物多样性服务、产水服务等指标有所下降(I-1 区),以及生境破碎(I-8 区)与人口胁迫(I-3 区)等指标有所上升。因此区域保护重点是加强生态系统综合质量保护,保护该区具有较高生态系统质量的森林、草地、湿地生态系统,保护区域自然斑块连通度,进一步提升生物多样性水平,构建湾区北部山地生态屏障。同时,需要在二级区范围内针对以上指标的退化区域进行针对性的生态系统修复,尤其要注重生物多样性水平建设和降低生境胁迫水平。关键控制因素为植被多样性水平,以及城镇建设用地的扩张对生境的破坏和胁迫。

(2) 水土保持与生物多样性综合保护区(分区 II)的生态现状本底优势在于区域水土保持、植被净初级生产力以及生物多样性水平处于较高水平。区域近年来也存在局部地区的水土保持、产水服务、生物多样性等生态系统服务功能退化,以及生境质量下降、人口胁迫指标有所上升等生态环境问题。因此,该分区生态建设需要以东北部地区林地生态屏障作用为主导,加强植被保护和水土保持能力建设与修复,并进一步提升生物多样性水平。尤其注重水土保持方面的修复,进一步实现分区总体目标。关键控制因素为人工水土保持措施、植被多样性以及森林蓄积量。从土地利用角度来说,应重视保护现有湿地,增强林地水源涵养功能,对坡耕地实施适当的退耕还林。

(3) 产水与自然斑块连通综合保护区(分区 III)的生态现状本底优势在于其产水服务、水土保持服务以及自然斑块的连通度处于较高水平。然而该区域的本底生态优势在近年来有所弱化,生态系统结构质量指标下降,生态系统胁迫则有所上升。土地利用/覆被变化数据显示,该区近十年湿地面积减少幅度为 5%,湿地生态系统服务不断下降,特别是极具岭南特色的桑基鱼塘生态系统大面积退化<sup>[39]</sup>。因此区域生态保护重点是改善该区的生态系统结构与质量,尤其注重湿地生态系统的保护修复,以进一步巩固区域生态优势本底。同时,该区域城市建设扩张趋势较为显著,近十年建设用地增长幅度为 18.8%,占用生态用地 4.6 万公顷。因此需要控制建设用地扩张对优质生态系统类型的占用,减少生境破碎化趋势,巩固和提升自然斑块的连通水平。

(4) 植被保护与水土保持区(分区 IV)的生态现状本底优势类型较少,正向指标数值相对偏小,其中植被净初级生产力与水土保持指标在本区域内处于中等偏高水平。与此同时,该区中的 IV-1 区的植被净初级生产力和水土保持近年来均出现较大幅度的退化。较大程度影响了一级区生态功能的实现。因此区域生态保护与修复的重点均为植被建设和水土保持。关键控制指标为森林蓄积量、植被覆盖度和人工水土保持措施。

(5) 产水服务维持区(分区 V)的生态现状本底优势在于其产水服务水平较高。主要是由于其处于珠江三角洲的入海口区域,河湖网密布,水量充裕。同时又由于该区域是珠三角城市核心地带,建设用地面积较大,不透水面占比较高,地表蒸散量低,进一步使得产水指标处于较高水平。因此维持该区域的水量,提升水质,加强河流水系廊道建设是该区域生态保护修复的重点和关键控制因素。与此同时,该区域城镇化水平较高,生态用地比例相对较低,仅占土地总面积的 24.3%。因此,该区域还应当注重城市内部稀缺的生态用地的保护,加强生态网络建设,提升生态用地文化休闲服务。

#### 4.2 本研究分区方法与其他相关研究的异同性

目前学者们大都采用“自上而下”与“自下而上”相结合的“分区指标+因子叠加”的国土空间生态保护修复分区方法。相关研究主要由以下几个方面来开展:以“双评价”结果为基础,基于生态修复目标和生态现状问题进行多级分区<sup>[15,40]</sup>;以生态系统服务供给和需求的评估结果为依据,根据供需关系区分不同的生态保护修复类型<sup>[19-20,41-42]</sup>;以区域生态安全格局构建为基础,确定影响生态安全格局的障碍因素或区域,从而确定修复区域,同时也针对高质量生态区域划定保护范围<sup>[16,43-44]</sup>;以生态适宜性评价为基础,提出生态管控分区<sup>[45]</sup>。此外,空间聚类方法在广义的生态分区中应用较多,但是在国土空间生态保护修复分区研究较少<sup>[46-47]</sup>。

本研究的分区方法并非单纯的分区指标的因子叠加,而是基于指标的空间异质性进行自下而上的空间聚

类。空间聚类方法主要利用了 ArcGIS 平台的空间分组分类工具,其算法采用 Calinski-Harabasz 伪  $F$  统计值评估聚类优劣。该工具集成性较好,并且得到的较好的应用<sup>[28]</sup>。其简便易操作,推广性较好。在分区时同时考虑了单元之间的临接性,便于生态管理。该方法的缺点在于严格按照最大  $F$  值分区并不一定能满足管理需求。本文一级分区中, $F$  值在两组时值最大。但是两个分区的面积差异较大,给管理应用带来困难,而且分区数量也难以满足管理需求。因此本文采用了  $F$  值下降的拐点处(第 5 组)作为较优组数。二级分区也基本按照此方式进行处理。因此,在应用该方法时,还需要考虑管理需求,同时可以尽量与其他相关界限(例如其他生态区划、生态保护红线、行政界线等)相衔接。

### 4.3 结论

本研究基于生态安全理论以及生态系统综合评估框架,构建国土空间生态保护修复分区多维指标体系,提升对生态系统的地域组合特征及其分异规律的系统性认知水平,为国土空间的山水林田湖草系统治理提供了生态分区优化路径。同时也为研究区生态保护修复提供了空间指导依据。本研究的主要结论为:

(1) 2020 年粤港澳大湾区生态现状综合指数平均值为 0.35,各流域的生态现状综合指数介于 0.08 至 0.90 之间。总体而言,各流域生态现状综合指数数值差异较大,且空间分异规律较为明显,呈现出外部高、中部低的圈层式分异特征。与此同时,大湾区的生态退化综合指数平均值为 -0.13,各流域的生态退化综合指数介于 -0.64 至 0.00 之间,各流域退化程度差异较大,退化空间分异明显且较为分散。

(2) 基于生态现状综合指数与一级分区指标数据的空间异质性,将大湾区划分为 5 个在空间上连续的生态保护修复一级区。分别为生态系统质量综合保护区、水土保持与生物多样性综合保护区、产水与自然斑块连通综合保护区、植被与水土保持区以及产水服务维持区。基于生态退化综合指数与二级分区指标数据的空间异质性,在一级区内部划分出 11 类 29 个生态保护修复二级区。

## 5 研究不足与展望

本研究基于自然界线确定分区的基本单元,从系统治理的角度来说具有科学性,但在指导实际问题时会与现有的行政单元出现差别,进而影响到该分区体系在县域、市域单元的应用。解决方案是与现有生态保护修复工程区或行政区结合使用,将生态保护修复工程范围或行政边界与本分区进行叠加,获取范围或行政边界内的主要生态保护修复分区类型。同时也可以通过范围或行政边界内指标值与分区的指标对比,分析区域目前的优势和短板,针对短板进一步加强治理。

在生态系统评估方面,本研究对于二级分区的生态系统退化及其面临问题的表征,主要通过生态系统相关指标的变化来体现。表征指标具有与上级指标一致性较好、数据易获取和计算等优势,但也存在时间尺度难以准确把握的问题。例如气候变化需要较长时间来反映,而人类活动强度的增强可以在较短时间内体现出来。因此,如果能够采用生态环境问题评估数据作为表征指标,将进一步提升分区的科学性。此外,本研究的生态退化特征更多是以指标值的减少特征来体现。但还未能对退化阈值进行判断。因此下一步研究将加强退化阈值研究,探究更为真实的退化特征。同时也将选取一级区的主导功能因素来探究退化特征。使得一级区和二级区的保护修复目标更为一致。

### 参考文献 (References):

- [1] 彭建,吕丹娜,董建权,刘焱序,刘前媛,李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.
- [2] 彭建,吕丹娜,张甜,刘前媛,林坚. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. 生态学报, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [3] 严金明,王晓莉,夏方舟. 重塑自然资源管理新格局: 目标定位、价值导向与战略选择. 中国土地科学, 2018, 32(4): 1-7.
- [4] 吴钢,赵萌,王辰星. 山水林田湖草生态保护修复的理论支撑体系研究. 生态学报, 2019, 39(23): 8685-8691.
- [5] 俞孔坚,乔青,李迪华,袁弘,王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1932-1939.
- [6] Sun C Z, König H J, Uthes S, Chen C, Li P, Hemminger K. Protection effect of overwintering water bird habitat and defining the conservation priority area in Poyang Lake wetland, China. Environmental Research Letters, 2020, 15(12): 125013.

- [ 7 ] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 杨宇民, 蔡青, 黎贝, 周敏. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256.
- [ 8 ] 宋伟, 韩贇, 刘琳. 山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究——以陕西省为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8975-8989.
- [ 9 ] 龙花楼, 张英男, 屠爽爽. 论土地整治与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(10): 1837-1849.
- [ 10 ] 沈悦, 严金明, 陈昊. 基于“三生”空间优化的城乡交错区土地整治功能单元划定. 农业工程学报, 2018, 34(11): 243-252.
- [ 11 ] 刘春芳, 王奕璇, 何瑞东, 王晨. 基于居民行为的三生空间识别与优化分析框架. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2113-2122.
- [ 12 ] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10.
- [ 13 ] 苏冲, 董建权, 马志刚, 乔娜, 彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [ 14 ] 覃盟琳, 朱梓铭, 胡城旗, 丁迪. 市县国土空间生态修复分区方法与修复策略研究——以崇左市天等县为例. 广西大学学报: 自然科学版, 2020, 45(4): 802-815.
- [ 15 ] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 邹长新, 郑好. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 7-14.
- [ 16 ] 刘春芳, 乌亚汗, 王川. 基于生态服务功能提升的高标准农田建设的分区方法. 农业工程学报, 2018, 34(15): 264-272.
- [ 17 ] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例. 生态学报, 2018, 38(20): 7300-7311.
- [ 18 ] 王萌辉, 白中科, 董潇楠. 基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区. 中国土地科学, 2018, 32(11): 73-80.
- [ 19 ] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 任国平, 康蕾. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. 资源科学, 2019, 41(7): 1359-1373.
- [ 20 ] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- [ 21 ] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查与评估. 北京: 科学出版社, 2019.
- [ 22 ] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 千庆兰, 郑子豪. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453-2462.
- [ 23 ] 李娜, 周金苗, 黄耀福, 黄玫瑜. 从巨型城市区域视角审视粤港澳大湾区空间结构. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1609-1622.
- [ 24 ] 宫清华, 张虹凤, 叶玉瑶, 袁少雄. 人地系统耦合框架下国土空间生态修复规划策略——以粤港澳大湾区为例. 地理研究, 2020, 39(9): 2176-2188.
- [ 25 ] 赵晓斌, 强卫, 黄伟豪, 钱实. 粤港澳大湾区发展的理论框架与发展战略探究. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1597-1608.
- [ 26 ] 周汝波, 林媚娟, 吴卓, 刘汉仪, 钟亮. 基于生态系统服务重要性的粤港澳大湾区生态安全格局构建. 生态经济, 2020, 36(7): 189-196.
- [ 27 ] Xu J Y, Chen J X, Liu Y X, Fan F F. Identification of the geographical factors influencing the relationships between ecosystem services in the Belt and Road region from 2010 to 2030. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 124153.
- [ 28 ] Caliński T, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1-27.
- [ 29 ] 吴健生, 王仰麟, 张小飞, 彭建, 刘焱序. 景观生态学在国土空间治理中的应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 14-25.
- [ 30 ] Lindenmayer D, Hobbs R J, Montague-Drake R, Alexandra J, Bennett A, Burgman M, Cale P, Calhoun A, Cramer V, Cullen P, Driscoll D, Fahrig L, Fischer J, Franklin J, Haila Y, Hunter M, Gibbons P, Lake S, Luck G, MacGregor C, McIntyre S, Nally R M, Manning A, Miller J, Mooney H, Noss R, Possingham H, Saunders D, Schmiegelow F, Scott M, Simberloff D, Sisk T, Tabor G, Walker B, Wiens J, Woinarski J, Zavaleta E. A checklist for ecological management of landscapes for conservation. Ecology Letters, 2008, 11(1): 78-91.
- [ 31 ] 苗鸿, 王效科, 欧阳志云. 中国生态环境胁迫过程区划研究. 生态学报, 2001, 21(1): 7-13.
- [ 32 ] 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 樊江文. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.
- [ 33 ] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [ 34 ] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(1): 135-139.
- [ 35 ] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, Guerry A, Tallis H, Ricketts T. InVEST User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2018.
- [ 36 ] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [ 37 ] Sun C Z, Xu S, Qi W, Chen C, Deng Y, Pei N C, König H J. Biodiversity constraint indicator establishment and its optimization for urban growth: framework and application. Environmental Research Letters, 2019, 14(12): 125006.
- [ 38 ] 江伟康, 吴隽宇. 基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [ 39 ] 陈彩霞, 叶玉瑶, 黄光庆, 宫清华, 刘旭拢. 粤港澳大湾区基塘多功能性尺度效应及生态修复策略. 生态学报, 2021, 41(9): 3394-3405.
- [ 40 ] 朱振肖, 王夏晖, 饶胜, 张箫, 李翠华, 李春红, 李迪华, 牟雪洁. 国土空间生态保护修复分区方法研究——以承德市为例. 环境生态学, 2020, 2(2/3): 1-7.
- [ 41 ] 刘春芳, 王伟婷, 刘立程, 李鹏杰. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2177-2190.
- [ 42 ] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 韦静娴, 卢有朋. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158.
- [ 43 ] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [ 44 ] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 李艺博, 李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [ 45 ] 成超男, 胡杨, 冯尧, 赵鸣. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462.
- [ 46 ] 柯新利, 刘曼, 邓祥征. 湖泊营养物生态分区: 中国东北的分区试验. 自然资源学报, 2014, 29(5): 789-800.
- [ 47 ] 许杨, 纪道斌, 何金艳, 阮洲, 陈炯, 石浩洋. 基于生态修复治理下的茅洲河流域生态分区. 三峡大学学报: 自然科学版, 2020, 42(4): 8-15.